

УДК 551.465

ГЕОХИМИЯ РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА И ЕГО ПОТОКИ В ТОЛЩЕ ВОД КАСПИЙСКОГО МОРЯ

© 2016 г. В. Н. Лукашин, А. П. Лисицын

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: lukashin@ocean.ru*

Поступила в редакцию 12.11.2015 г.

Представлены первые данные по химическому составу рассеянного вещества из седиментационных ловушек. Рассмотрены взвесеобразующие компоненты осадочного вещества – аморфный кремнезем, органическое вещество, карбонаты и литогенное вещество, а также Fe, Mn и микроэлементы. В результате установлено, что внутригодовая изменчивость вертикальных потоков осадочного вещества показывает сезонные увеличения весной и осенью. Высокие потоки компонентов осадочного вещества над северным и южным склонами Дербентской впадины зимой обусловлены осаждением материала из нефелоидного слоя, сформированного контурным течением.

DOI: 10.7868/S0030157416050099

Исходное вещество для образования донных осадков в океанах и морях находится в водной толще в виде взвеси, т.е. дисперсных частиц разной крупности и генезиса. Взвесь в морях и океанах формируется преимущественно в верхней части водной толщи в результате взаимодействия вещества различных геосфер (литосферы, атмосферы, гидросферы, криосферы, биосферы и эндосферы) [12] и состоит соответственно из литогенных, биогенных, гидрогенных, антропогенных и эндогенных (вулканогенных, гидротермальных) частиц. Тонкодисперсные микро- и наночастицы взвеси агрегируются преимущественно под влиянием биологических – фильтрации воды организмами зоопланктона с превращением осадочного вещества в pellets и аморфные комки (морской снег), а также физико-химических (коагуляция, флокуляция коллоидов) процессов. Скорость осаждения агрегатов взвеси в десятки раз выше скоростей осаждения отдельных рассеянных частиц [28, 30–32 и др.]. Формируются вертикальные потоки осадочного вещества, которое трансформируется при прохождении водной толщи и в конечном счете достигает дна. Поток выражается в мг/м²/сут или г/м²/год (в зависимости от длительности непрерывного сбора вещества).

Состав осаждающегося агрегированного вещества формируется из литогенных частиц, принесенных в море с речным стоком и через атмосферу, биогенных, принесенных с суши, а в основном образованных в море, и гидрогенных (аутигенных), образованных в результате химических реакций в различных физико-химических условиях водной толщи (гидроксиды, карбонаты,

сульфиды). Породообразующие элементы (Si, Al, Ca, Mg, Fe и др.) приносятся в море с окружающих водосборов с речным стоком и через атмосферу с аэрозолями в составе терригенных минералов. Эти же элементы, кроме Al, в море образуют аутигенные минералы Ca (кальцит, Mg-кальцит, родохрозит, кутнагорит, гипс), аморфные образования (панцири диатомовых водорослей, гидроксиды Fe и Mn). С ними связаны, как правило, микроэлементы, изоморфно замещающие их в кристаллических решетках, соосажденные с гидроксидами и адсорбированные на их поверхностях и поверхностях глинистых минералов.

Каспийское море является уникальным внутренним бассейном, расположенным в гумидной, семиаридной и аридной зонах, что определяет характер питания бассейна осадочным материалом. В акваторию Северного Каспия осадочный материал поступает главным образом с речным стоком, тогда как в западную часть Среднего и Южного Каспия поставка его осуществляется речным стоком и в виде аэрозолей через атмосферу, а в восточную часть этих акваторий только через атмосферу. Кроме того, на дне Южного Каспия обнаружено множество грязевых вулканов, которые также являются важным источником осадочного вещества, а с полуострова Челекен в море разгружаются гидротермальные источники. Таким образом, в Каспийском море при формировании осадочного материала в водной толще взаимодействуют вышеназванные геосферы. Для Каспийского моря характерно также возникновение придонного слоя с сероводородным заражением (при высоком уровне моря), что отмеча-

лось С.В. Бруевичем в начале 30-х годов прошлого столетия [2, 3]. В 50–90-х годах (при низком уровне моря) сероводород в водах Каспия не обнаруживался, водная толща в Северном и Южном Каспии вентилировалась за счет зимнего каскадинга насыщенных кислородом поверхностных вод [3, 11, 25]. В последние десятилетия вновь формируется придонный слой воды с присутствием сероводорода [1, 8, 24, 36], что влияет на седиментационные процессы.

Настоящая работа, в которой приводятся первые данные о геохимии рассеянного вещества, продолжает серию уже опубликованных статей о системе Каспийского моря, а основная ее цель — исследование химического состава осаждающейся взвеси и его изменчивости во времени и пространстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал получен седиментационными ловушками, установленными на глубинных обсерваториях АГОС в 2009–2010 гг. на транскаспийском разрезе (рис. 1а) [16, 17]. Исследования с использованием обсерваторий АГОС дают возможность изучать характеристики среды и ход осадочного процесса в море в 4-мерной системе (время и три координаты пространства). После определения общих величин потоков пробы анализировались на минеральный состав, макро- и микроэлементы. Содержания определялись $C_{\text{вал}}$ и $C_{\text{орг}}$ кулонометрическим методом, а Si, Al и P — фотометрическим. Разность $C_{\text{вал}}$ и $C_{\text{орг}}$ составляет $C_{\text{карб}}$, по которому рассчитываются карбонаты. Это дает возможность установить как общий состав рассеянного в воде осадочного материала, так и совокупность биогенных (биогенная триада: $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ + органическое вещество (ОВ) + CaCO_3) и литогенных компонентов (индикатор Al и Si силикатный). Железо, марганец и микроэлементы определялись методами ICP MS (Agilent 7500) и атомно-абсорбционным (Спектр-2). Гидрогенные формы Fe и Mn выделялись методом терригенной матрицы. За терригенную матрицу взвеси принят состав глин и сланцев Русской платформы [23].

Биогенная кремнистая часть (панцири диатомовых) — это аморфный кремнезем ($\text{Si}_{\text{ам}}$), определяемый или методом терригенной матрицы по Al-модулю [27], или прямым определением $\text{Si}_{\text{ам}}$ [33]. Индикатором органического вещества служит $C_{\text{орг}}$ (ОВ = удвоенное $C_{\text{орг}}$). Карбонатная часть рассчитывается по $C_{\text{карб}}$. Карбонатные минералы во взвеси представлены биогенными и хемогенными образованиями. Кроме терригенных карбонатов, вынесенных с суши, встречаются и автохтонные минералы, образованные непосредственно в море в результате прямой садки из морской

воды [4, 9, 25]. Литогенная часть рассчитывается по измеренному в веществе из седиментационных ловушек содержанию Al.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Макрокомпоненты. Для потоков осадочного вещества на транскаспийском разрезе характерно общее уменьшение с удалением от берегов и ростом глубин. Эта закономерность нарушается в придонных слоях и над склонами (глубины 300–450 м) из-за дополнительного поступления осадочного материала из нефелоидного слоя [18]. В центре Дербентской впадины отмечается незначительное увеличение потоков в нижних слоях водной толщи, что, возможно, связано с влиянием речного стока (рек Волга и Урал), а также с поступлением осадочного вещества со склонов. В Южной впадине потоки распределяются по классической схеме — уменьшаются с глубиной. Над южным склоном Апшеронского порога (глубина 696 м) придонное течение не обнаружено, но в придонных слоях воды потоки значительно увеличиваются, что связано, по-видимому, с гравитационными процессами на склоне [14]. В центральной части Южной впадины потоки минимальны для моря [18] — здесь в аридной зоне минимально влияние рек.

Одностванные седиментационные ловушки используются для сбора суммарного (валового) материала, накопившегося в течение их экспозиции. Результаты анализов вещества приведены в табл. 1. По данным таблицы с пересчетом на взвесеобразующие компоненты построены схемы распределения содержаний взвесеобразующих компонентов в водной толще (рис. 1б, столбцы) в местах постановки обсерваторий АГОС.

Для распределения **содержаний $\text{SiO}_{2\text{ам}}$** характерно уменьшение с глубиной на всех станциях, связанное с растворением панцирей диатомовых водорослей при осаждении. Латеральное распределения потоков $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ показывает уменьшение к центрам впадин (рис. 2). В Дербентской впадине потоки $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ с глубиной снижаются, что соответствует уменьшению потока диатомовых водорослей [18]. Максимумы приурочены к шельфу и склонам Дербентской впадины. В Южно-Каспийской впадине содержания и потоки $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ также уменьшаются с удалением от склона Апшеронского порога (рис. 1б, 2).

Содержание ОВ также уменьшается с глубиной (органическое вещество взвеси растворяется). Отмечается незначительный рост его содержаний в глубинных слоях котловин (прекращение регенерации органики в зонах сероводородного заражения). Вертикальные потоки органического вещества в Дербентской котловине также уменьшаются и с удалением в море, и с глубиной.

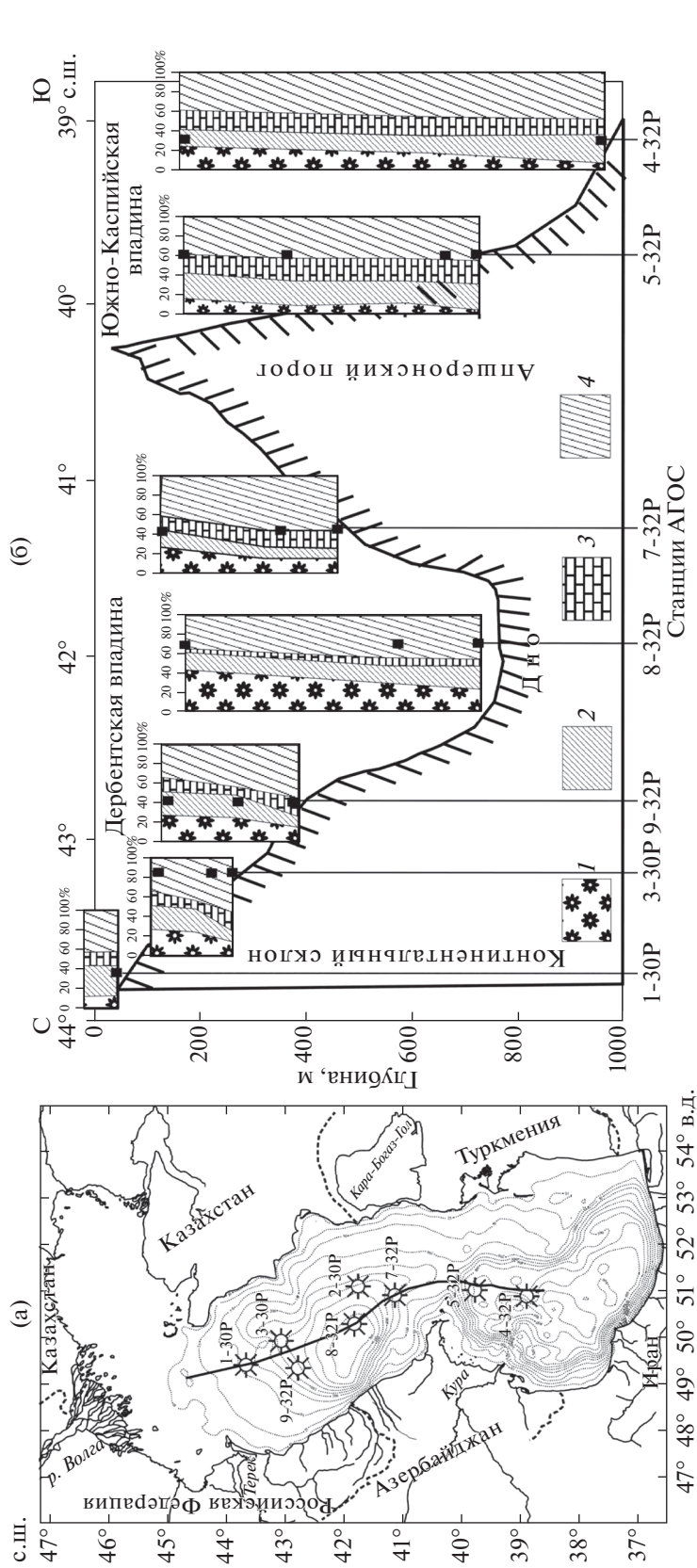


Рис. 1. Расположение седиментационных обсерваторий и распределение главных компонентов вертикальных потоков на транскаспийском разрезе ($\text{mg/m}^2/\text{сут.}$). (а) – Схема расположения глубинных обсерваторий: линией обозначено положение транскаспийского разреза, звездочки и цифры – положение и номера обсерваторий АГОС; (б) – Содержание взвешиваемых компонентов в водной толще (%) на транскаспийском разрезе. 1 – $\text{SiO}_{2\text{am}}$, 2 – органическое вещество, 3 – CaCO_3 , 4 – литогенное вещество.

Таблица 1. Содержания химических элементов в осаждающемся материале (Si–Mn в %, микроэлементы в 10⁻⁴%)

| Станция, координаты, глубина | Горизонт, м | Потоки, мг/м ² /сут | Si | Si _{ам} | Al | P | C _{орг} | C _{карб} | Fe | Mn | Cu | Zn | Ni | Co | Cr | Be |
|---|----------------|-----------------------------------|-------|------------------|------|-------|------------------|-------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 1-30P, 43°40.31' с.ш.; 43°40.31' в.д. 65.5 м | 48 | 13955 | 14.28 | 5.25 | 3.02 | 0.20 | 17.31 | 2.46 | 1.92 | 0.019 | 29 | 88 | 38 | 2.3 | 36 | 1.0 |
| | 220 | 470 | 18.11 | 12.72 | 3.86 | 0.08 | 4.98 | 2.06 | 3.15 | 0.1 | 36 | 340 | 65 | 10.5 | 77 | 1.8 |
| 2-30P 41°45.87' с.ш.; 50°57.73' в.д. 520 м | 320 | 509 | 14.54 | 7.07 | 5.35 | 0.09 | 4.08 | 2.03 | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. |
| | 420 | 457 | 14.44 | 7.26 | 5.14 | 0.12 | 3.14 | 2.25 | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. |
| | 500 IV–V | 495 | 22.84 | 5.26 | 5.88 | 0.11 | 5.18 | 2.26 | 2.40 | 0.64 | 29 | 60 | 64 | 15 | 70 | 1.1 |
| | V–VI | 238 | 20.18 | 2.81 | 5.81 | 0.11 | 3.46 | 2.08 | 1.65 | 3.13 | 37 | 92 | 106 | 27 | 50 | 1.1 |
| | VI–VII | 44.2 | 18.16 | 0.94 | 5.76 | 0.09 | 2.68 | 2.23 | 1.50 | 5.03 | 33 | 115 | 110 | 49 | 47 | 0.8 |
| | VII–VIII | 3.8 | 10.28 | 0.00 | 4.86 | 0.17 | 2.34 | 2.18 | 1.23 | 4.00 | 26 | 170 | 92 | 36 | 37 | 0.8 |
| | VIII–IX | 21.5 | 9.14 | 0.00 | 4.14 | 0.14 | 2.04 | 2.48 | 2.05 | 5.9 | 23 | 280 | 72 | 32 | 45 | 0.9 |
| 3-30P 43°07.44' с.ш.; 49°43.74' в.д. 320 м | 100 | 214 | 28.27 | 24.56 | 1.23 | 0.09 | 7.10 | 2.02 | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. |
| | 200 | 273 | 25.27 | 23.16 | 1.51 | 0.07 | 4.97 | 2.26 | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. |
| | 270 | 381 | 29.20 | 23.92 | 2.00 | 0.09 | 5.00 | 2.12 | 1.28 | 0.07 | 34 | 380 | 31 | 9.2 | 61 | 1.2 |
| 4-32P 39°03.32' с.ш.; 50°48.51' в.д. 975 м | 130 | 244 | 12.61 | 4.70 | 2.65 | 0.13 | 17.73 | 2.61 | 1.90 | 0.035 | 45 | 130 | 62 | 7.5 | 68 | 1.2 |
| | 955 IX–X | 69 | 10.89 | 3.03 | 2.63 | 0.23 | 18.90 | 2.55 | 1.73 | 0.027 | 58 | 66 | 60 | 4 | 64 | 0.8 |
| | X–XI | 251 | 10.14 | 0.28 | 3.30 | 0.14 | 18.59 | 4.34 | 2.60 | 0.027 | 130 | 68 | 140 | 9.5 | 97 | 1.3 |
| | XI–XII | 126 | 11.80 | 2.97 | 2.95 | 0.16 | н.о. | н.о. | 2.20 | 0.018 | 120 | 60 | 96 | 5.4 | 74 | 1.0 |
| | XII–I | 141 | 10.95 | 1.35 | 3.21 | 0.17 | 21.04 | 1.70 | 2.25 | 0.020 | 155 | 60 | 114 | 7.7 | 83 | 1.2 |
| | I–II | 20 | 11.80 | 2.91 | 2.97 | 0.18 | н.о. | н.о. | 2.15 | 0.017 | 174 | 96 | 90 | 6.5 | 67 | 1.1 |
| | II–III | 13 | 10.95 | 1.35 | 3.21 | 0.16 | 19.22 | 6.07 | 2.50 | 0.025 | 127 | 85 | 86 | 2 | 74 | 1.0 |
| | III–IV | 15 | 14.65 | 1.74 | 4.32 | 0.15 | н.о. | н.о. | 3.05 | 0.028 | 165 | 125 | 90 | 6.9 | 85 | 1.5 |
| | IV–V | 16 | 16.74 | 2.28 | 4.84 | 0.15 | 13.50 | 0.43 | 3.00 | 0.03 | 137 | 78 | 86 | 5.7 | 84 | 1.6 |
| 5-32P 39°39.43' с.ш.; 50°56.33' в.д. 716 м | V–VI | 32 | 15.15 | 2.70 | 4.16 | 0.14 | 12.94 | 0.58 | 2.80 | 0.030 | 136 | 110 | 102 | 7 | 94 | 1.5 |
| | 160 | 330 | 17.71 | 7.35 | 3.46 | 0.11 | 14.27 | 2.31 | 3.05 | 0.079 | 37 | 180 | 47 | 1 | 97 | 2.7 |
| | 360 | 360 | 15.57 | 4.37 | 3.75 | 0.15 | 12.55 | 2.93 | 2.40 | 0.05 | 45 | 125 | 64 | 8.6 | 69 | 1.6 |
| | 560 | 182 | 12.78 | 5.10 | 3.82 | 0.14 | 11.98 | 2.87 | 3.05 | 0.04 | 50 | 102 | 90 | 17 | 75 | 1.4 |
| | 685 | 648 | 7.57 | 1.88 | 4.07 | 0.20 | 14.12 | 3.21 | 2.45 | 3.4 | 48 | 88 | 74 | 16 | 67 | 1.5 |
| 7-32P 41°26.82' с.ш.; 50°51.82' в.д. 456 м | 696 | 759 | 7.91 | 2.38 | 3.96 | 0.23 | 14.37 | 2.70 | 2.15 | 5.27 | 54 | 110 | 120 | 20 | 56 | 1.1 |
| | 100 | 542 | 17.92 | 12.79 | 3.67 | 0.11 | 9.54 | 1.77 | 2.50 | 0.05 | 23 | 93 | 44 | 8.1 | 69 | 1.6 |
| | 300 | 2178 | 13.84 | 6.88 | 5.74 | 0.12 | 6.17 | 2.03 | 3.90 | 0.1 | 29 | 85 | 66 | 11.5 | 90 | 1.9 |
| 8-32P 41°49.55' с.ш.; 50°23.29' в.д. 753 м | 435 | 3550 | 14.50 | 7.43 | 5.09 | 0.12 | 5.34 | 2.35 | 3.95 | 0.56 | 32 | 80 | 73 | 15 | 88 | 1.9 |
| | 150 | 298 | 25.86 | 21.44 | 3.16 | 0.09 | 10.01 | 0.56 | 2.05 | 0.029 | 32 | 93 | 56 | 7.2 | 55 | 1.3 |
| | 550 | 454 | 20.05 | 14.53 | 3.95 | 0.07 | 9.48 | 1.04 | 2.57 | 0.166 | 41 | 80 | 75 | 13.2 | 60 | 1.3 |
| | 705 | 417 | 16.52 | 10.96 | 3.98 | 0.12 | 13.74 | 0.66 | 3.20 | 0.43 | 45 | 78 | 82 | 12 | 57 | 1.5 |
| | 735–XI | 127 | 24.16 | 10.14 | 4.69 | 0.32 | 14.18 | 0.70 | 3.00 | 0.27 | 88 | 95 | 90 | 2 | 96 | 1.4 |
| | XI–XII | 754 | 16.32 | 3.11 | 4.42 | 0.11 | 13.80 | 0.76 | 3.30 | 0.058 | 50 | 69 | 71 | 8.4 | 71 | 1.4 |
| | XII–I | 331 | 10.14 | 0.00 | 4.18 | 0.12 | 13.75 | 0.62 | 3.70 | 0.098 | 60 | 76 | 78 | 9.6 | 80 | 1.8 |
| | I–II | 112 | 9.28 | 0.00 | 4.05 | 0.11 | 10.12 | 0.68 | 4.20 | 0.115 | 117 | 152 | 95 | 8.5 | 97 | 1.8 |
| | II–III | 57 | 8.35 | 0.00 | 4.36 | 0.13 | 10.18 | 0.71 | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. |
| | III–IV | 148 | 11.64 | 0.00 | 5.18 | 0.13 | 11.00 | 0.89 | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. |
| IV–V | 168 | 17.25 | 8.14 | 3.05 | 0.13 | 12.30 | 0.81 | 3.50 | 0.16 | 95 | 120 | 44 | 1 | 50 | 1.4 | |
| V–VI | 835 | 24.04 | 10.14 | 4.69 | 0.32 | 14.18 | 0.70 | 3.00 | 0.27 | 88 | 95 | 90 | 2 | 96 | 1.4 | |

Таблица 1. Продолжение

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|-----------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-----|
| 9-32P 42°43.64' с.ш.; 49°17.43' в.д. 417 м | 120 | 262 | 18.10 | 13.90 | 3.01 | 0.12 | 12.40 | 2.01 | 1.60 | 0.023 | 30 | 130 | 35 | 5.6 | 45 | 0.9 |
| | 270 | 407 | 17.86 | 12.34 | 3.95 | 0.13 | 12.23 | 1.09 | 2.22 | 0.05 | 26 | 103 | 49 | 8.6 | 62 | 1.5 |
| | 380 | 1046 | 14.22 | 7.20 | 5.03 | 0.30 | 4.92 | 2.23 | 3.63 | 0.02 | 42 | 140 | 36 | 27 | 90 | 0.7 |
| | 396 X–XI | 149 | 9.48 | 0.00 | 4.12 | 0.08 | 7.30 | 2.41 | 2.52 | 2.25 | 57 | 190 | 130 | 40 | 110 | 1.5 |
| | XI–XII | 758 | 9.60 | 0.00 | 4.55 | 0.10 | 6.9 | 2.31 | 2.05 | 2.17 | 40 | 92 | 78 | 30 | 116 | 0.7 |
| | XII–I | 1856 | 8.64 | 0.00 | 3.62 | 0.10 | 6.98 | 2.09 | 4.45 | 3 | 47 | 100 | 105 | 45 | 118 | 1.3 |
| | I–II | 1665 | 12.11 | 0.00 | 4.82 | 0.23 | 5.30 | 1.80 | 5.50 | 2.35 | 47 | 95 | 102 | 42 | 260 | 1.6 |
| | II–III | 939 | 12.30 | 0.00 | 4.96 | 0.34 | 6.37 | 2.06 | 5.62 | 1.6 | 42 | 130 | 102 | 34 | 150 | 1.7 |
| | III–IV | 612 | 20.26 | 1.96 | 6.12 | 0.22 | 6.08 | 2.36 | 3.30 | 0.42 | 35 | 108 | 91 | 18 | 480 | 1.4 |
| | IV–V | 287 | 25.12 | 9.33 | 5.28 | 0.11 | 6.14 | 2.06 | 3.50 | 0.22 | 28 | 120 | 220 | 9.5 | 6500 | 1.7 |
| V–VI | 767 | 27.53 | 9.23 | 6.12 | 0.10 | 5.32 | 1.80 | 3.15 | 0.24 | 30 | 144 | 127 | 11.9 | 1600 | 1.4 | |
| | | Pb | Ti | V | Ge | Zr | Nb | Mo | Sb | Ba | Ta | W | Tl | U | | |
| 1 | 2 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | | |
| 1-30P. 43°40.31' с.ш.; 43°40.31' в.д. 65.5 м | 48 | 18.3 | 0.14 | 50 | 0.20 | 80 | 5.2 | 1.0 | 0.2 | 3000 | 0.28 | 1.0 | 0.16 | 1.5 | | |
| 2-30P 41°45.87' с.ш.; 50°57.73' в.д. 520 м | 220 | 31.0 | 0.39 | 130 | 1.97 | 210 | 12.3 | 1.4 | 1 | 4200 | 0.70 | 1.9 | 0.39 | 5.0 | | |
| | 320 | н.о. | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о. | н.о | н.о | н.о | н.о | | |
| | 420 | н.о. | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о. | н.о | н.о | н.о | н.о | | |
| | 500 IV–V* | 16.8 | 0.26 | 108 | 1.27 | 165 | 6.1 | 4.8 | 1.6 | 3480 | 1.00 | 2.3 | 0.35 | 2.5 | | |
| | V–VI | 25.6 | 0.18 | 128 | 1.15 | 56 | 4.0 | 28.6 | 3.8 | 3150 | 0.58 | 4.4 | 0.41 | 2.3 | | |
| | VI–VII | 22 | 0.04 | 117 | 0.65 | 25 | 1.5 | 35.3 | 5.9 | 3840 | 0.20 | 3.5 | 0.37 | 2.3 | | |
| | VII–VIII | 30 | 0.12 | 80 | 0.45 | 23 | 3.6 | 28.2 | 2.4 | 1880 | 0.43 | 7.9 | 0.27 | 2.1 | | |
| | VIII–IX | 32 | 0.17 | 76 | 1.00 | 22 | 3.7 | 30.3 | 4.8 | 1420 | 0.50 | 6.0 | 0.30 | 2.1 | | |
| 3-30P 43°07.44' с.ш.; 49°43.74' в.д. 320 м | 100 | н.о. | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о. | н.о | н.о | н.о | н.о | | |
| | 200 | н.о. | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о | н.о. | н.о | н.о | н.о | н.о | | |
| | 270 | 28 | 0.15 | 64 | 0.59 | 56 | 4.6 | 1.8 | 0.25 | 0.36 | 0.20 | 1.3 | 0.24 | 2.5 | | |
| 4-32P 39°03.32' с.ш.; 50°48.51' в.д. 975 м | 130 | 29.4 | 0.25 | 90 | 1.14 | 82 | 7.8 | 3.2 | 1 | 960 | 0.42 | 1.8 | 0.45 | 3.7 | | |
| | 955 IX–X | 14 | 0.21 | 63 | 0.70 | 75 | 5.4 | 5.2 | 2.6 | 820 | 0.55 | 2.5 | 0.33 | 1.5 | | |
| | X–XI | 237 | 0.38 | 135 | 1.35 | 163 | 9.2 | 12.4 | 10.7 | 1770 | 0.97 | 1.3 | 0.87 | 2.3 | | |
| | XI–XII | 19 | 0.26 | 97 | 1.05 | 84 | 6.5 | 12.2 | 11.0 | 1200 | 0.70 | 3.9 | 0.83 | 1.8 | | |
| | XII–I | 23.5 | 0.26 | 126 | 0.92 | 90 | 6.3 | 16.1 | 16.1 | 1440 | 0.58 | 2.4 | 1.10 | 2 | | |
| | I–II | 21.6 | 0.26 | 102 | 0.95 | 92 | 6.3 | 4.5 | 13.9 | 1150 | 0.60 | 2.1 | 1.15 | 1.8 | | |
| | II–III | 22.3 | 0.25 | 101 | 0.70 | 75 | 5.8 | 3.4 | 15.5 | 1060 | 0.60 | 4.5 | 0.72 | 1.7 | | |
| | III–IV | 26.4 | 0.36 | 145 | 1.56 | 135 | 8.0 | 7.4 | 19.5 | 1140 | 0.66 | 2.0 | 1.20 | 2.3 | | |
| | IV–V | 27 | 0.33 | 142 | 1.35 | 115 | 7.2 | 3.4 | 15.8 | 1120 | 0.50 | 4.2 | 0.90 | 2.8 | | |
| V–VI | 28.5 | 0.33 | 135 | 1.36 | 100 | 7.0 | 3.1 | 11.4 | 1180 | 0.54 | 3.3 | 0.82 | 2.5 | | | |
| 5-32P 39°39.43' с.ш.; 50°56.33' в.д. 716 м | 160 | 38.0 | 0.39 | 150 | 0.55 | 68 | 13.4 | 3.4 | 0.25 | 1500 | 0.86 | 2.4 | 0.45 | 3.6 | | |
| | 360 | 24 | 0.33 | 123 | 1.50 | 196 | 10 | 1.7 | 0.8 | 0.10 | 0.73 | 1.7 | 0.35 | 2.5 | | |
| | 560 | 26.4 | 0.35 | 132 | 1.60 | 170 | 9.9 | 3.5 | 1.3 | 1180 | 0.64 | 2.3 | 0.41 | 2.5 | | |
| | 685 | 22 | 0.30 | 140 | 1.50 | 130 | 8.4 | 18.2 | 5.2 | 0.11 | 0.55 | 5.1 | 0.27 | 3.3 | | |
| | 696 | 39.0 | 0.24 | 150 | 1.20 | 137 | 9.6 | 11.6 | 6.9 | 1200 | 0.48 | 6.7 | 0.22 | 2.0 | | |
| 7-32P 41°26.82' с.ш.; 50°51.82' в.д. 456 м | 100 | 19.1 | 0.34 | 123 | 1.78 | 180 | 9.6 | 1.4 | 0.54 | 2400 | 0.70 | 1.8 | 0.39 | 2.7 | | |
| | 300 | 21.1 | 0.53 | 176 | 2.23 | 315 | 12.8 | 1.5 | 0.67 | 2000 | 1.00 | 2.7 | 0.52 | 2.9 | | |
| | 435 | 21.5 | 0.52 | 180 | 2.35 | 284 | 13.1 | 4.6 | 1.4 | 1800 | 1.10 | 3.2 | 0.58 | 2.8 | | |

Таблица 1. Окончание

| 1 | 2 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | | |
|---|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| 8-32P 41°49.55' с.ш.; 50°23.29' в.д. 753 м | 150 | 17.5 | 0.28 | 103 | 1.54 | 166 | 8.0 | 1.3 | 0.6 | 2200 | 0.45 | 1.6 | 0.36 | 3.1 | | |
| | 550 | 18.4 | 0.33 | 127 | 1.76 | 205 | 9.1 | 1.8 | 1.1 | 2600 | 0.60 | 5.1 | 0.36 | 2.9 | | |
| | 705 | 20 | 0.35 | 133 | 1.94 | 245 | 8.9 | 3.3 | 1.8 | 0.25 | 0.75 | 2.8 | 0.43 | 3.2 | | |
| | 735 X–XI | 43 | 0.23 | 94 | 0.94 | 56 | 5.6 | 4.7 | 1.0 | 800 | 0.50 | 4.4 | 0.60 | 4.9 | | |
| | XI–XII | 19.4 | 0.30 | 116 | 1.35 | 110 | 6.5 | 1.8 | 0.6 | 720 | 0.48 | 1.5 | 0.43 | 2.4 | | |
| | XII–I | 26.4 | 0.37 | 92 | 1.73 | 100 | 8.0 | 2.4 | 4.3 | 650 | 0.60 | 1.9 | 0.54 | 3.8 | | |
| | I–II | 40 | 0.38 | 150 | 1.68 | 68 | 8.7 | 2.9 | 1.3 | 520 | 0.75 | 3.2 | 0.60 | 5.6 | | |
| | II–III | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | | |
| | III–IV | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | | |
| | IV–V | 23.3 | 0.20 | 78 | 0.62 | 50 | 4.6 | 3.2 | 3.7 | 1900 | 0.46 | 2.2 | 0.55 | 6.5 | | |
| V–VI | 22.2 | 0.26 | 109 | 1.30 | 80 | 5.7 | 2.0 | 3.8 | 3000 | 0.45 | 2.0 | 0.76 | 4.8 | | | |
| V | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | | | |
| 9-32P 42°43.64' с.ш.; 49°17.43' в.д. 417 м | 120 | 16.0 | 0.19 | 70 | 1.18 | 100 | 6.2 | 1.3 | 0.28 | 2800 | 0.38 | 1.1 | 0.24 | 2.8 | | |
| | 270 | 37 | 0.21 | 120 | 0.50 | 56 | 5.0 | 9.0 | 0.9 | 0.16 | 0.33 | 2.7 | 0.40 | 4.7 | | |
| | 380 | 18 | 0.16 | 83 | 0.86 | 145 | 4.6 | 8.0 | 2.1 | 0.16 | 0.98 | 2.9 | 0.23 | 2.3 | | |
| | 396 X–XI | 37 | 0.21 | 120 | 0.50 | 56 | 5.0 | 9.0 | 0.9 | 1600 | 0.33 | 2.7 | 0.40 | 4.7 | | |
| | XI–XII | 18 | 0.16 | 83 | 0.86 | 145 | 4.6 | 8.0 | 2.1 | 1600 | 0.98 | 2.9 | 0.23 | 2.3 | | |
| | XII–I | 21 | 0.30 | 148 | 2.00 | 205 | 7.2 | 11.4 | 4.4 | 2600 | 0.56 | 5.5 | 0.37 | 2.6 | | |
| | I–II | 22.5 | 0.34 | 116 | 2.30 | 220 | 8.1 | 16.1 | 5.0 | 2800 | 0.58 | 6.4 | 0.35 | 2.7 | | |
| | II–III | 24.4 | 0.43 | 175 | 2.68 | 285 | 9.8 | 7.5 | 3.8 | 3300 | 0.78 | 5.0 | 0.50 | 3.4 | | |
| | III–IV | 17.8 | 0.36 | 153 | 2.10 | 175 | 9.0 | 14.5 | 1.2 | 960 | 0.60 | 4.5 | 0.48 | 3.5 | | |
| IV–V | 33 | 0.33 | 210 | 2.30 | 94 | 7.7 | 9.0 | 0.6 | 1060 | 0.38 | 12.7 | 0.54 | 7.7 | | | |
| V–VI | 21.6 | 0.27 | 125 | 1.85 | 110 | 6.8 | 22 | 0.5 | 3180 | 0.46 | 2.5 | 0.43 | 4.2 | | | |
| Среднее | | 30 | 0.29 | 120 | 1.35 | 124 | 7.4 | 8.6 | 4.6 | 1880 | 0.60 | 3.48 | 0.52 | 3.12 | | |

Примечание. Римские цифры обозначают месяцы 2009–2010 гг.

Минимальные содержания ОВ отмечены над северным и южным склонами Дербентской впадины, что обусловлено разбавлением осаждающейся из продуктивного слоя взвеси терригенным материалом нефелоидного слоя. Поток ОВ здесь несколько увеличивается по сравнению с вышележащими слоями.

В Южно-Каспийской впадине содержания органического вещества значительно выше, чем в Дербентской котловине, во всей водной толще (табл. 1, рис. 1б). Это определяется малым разбавлением автохтонной органики терригенным материалом речного стока, по сравнению со Средним Каспием. Однако потоки ОВ ($\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$) в Южном Каспии — ниже в верхнем слое и выше в придонном, что обусловлено, по-видимому, сохранностью органического вещества в условиях сероводородного заражения и перераспределением его в зоне активного грязевого вулканизма.

Карбонатный материал обнаружен во всех седиментационных ловушках. Максимальные значения — над склонами, что обусловлено распространением биогенных карбонатов (ракуши), а также аутигенных (оолитов) во взвеси и осадках шельфа и верхней части склона. Содержание кар-

бонатов во взвеси уменьшается с удалением от источников. В центральной части Дербентской впадины их содержания минимальны, обнаружены только кальцит и доломит — терригенные минералы, выносимые р. Волгой [12], и аэрозолями [19]. В Южно-Каспийской впадине содержание карбонатов, так же как и ОВ, выше, чем в Дербентской, из-за меньшего разбавления взвеси литогенным веществом речного стока.

Иначе идет распределение потоков карбонатного материала. Как и содержания, потоки уменьшаются с удалением от источников (речной сток Северного Каспия и шельф с ракушей). На шельфе вертикальные потоки карбонатов максимальны. Над склонами, в зоне прохождения контурного течения, потоки повышаются. В центральных областях глубоководных впадин, в верхней части водной толщи потоки карбонатов минимальны ($<20 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$). Это связано с незначительной поставкой карбонатного осадочного вещества из Северного Каспия, главную роль играет поступление с аэрозолями [19]. Увеличение потоков у дна (на глубинах более 500 м) происходит, вероятно, за счет поставки осадочного материала со склонов. В Южном Каспии потоки карбонатов ниже, чем в Среднем Каспии, повышен-

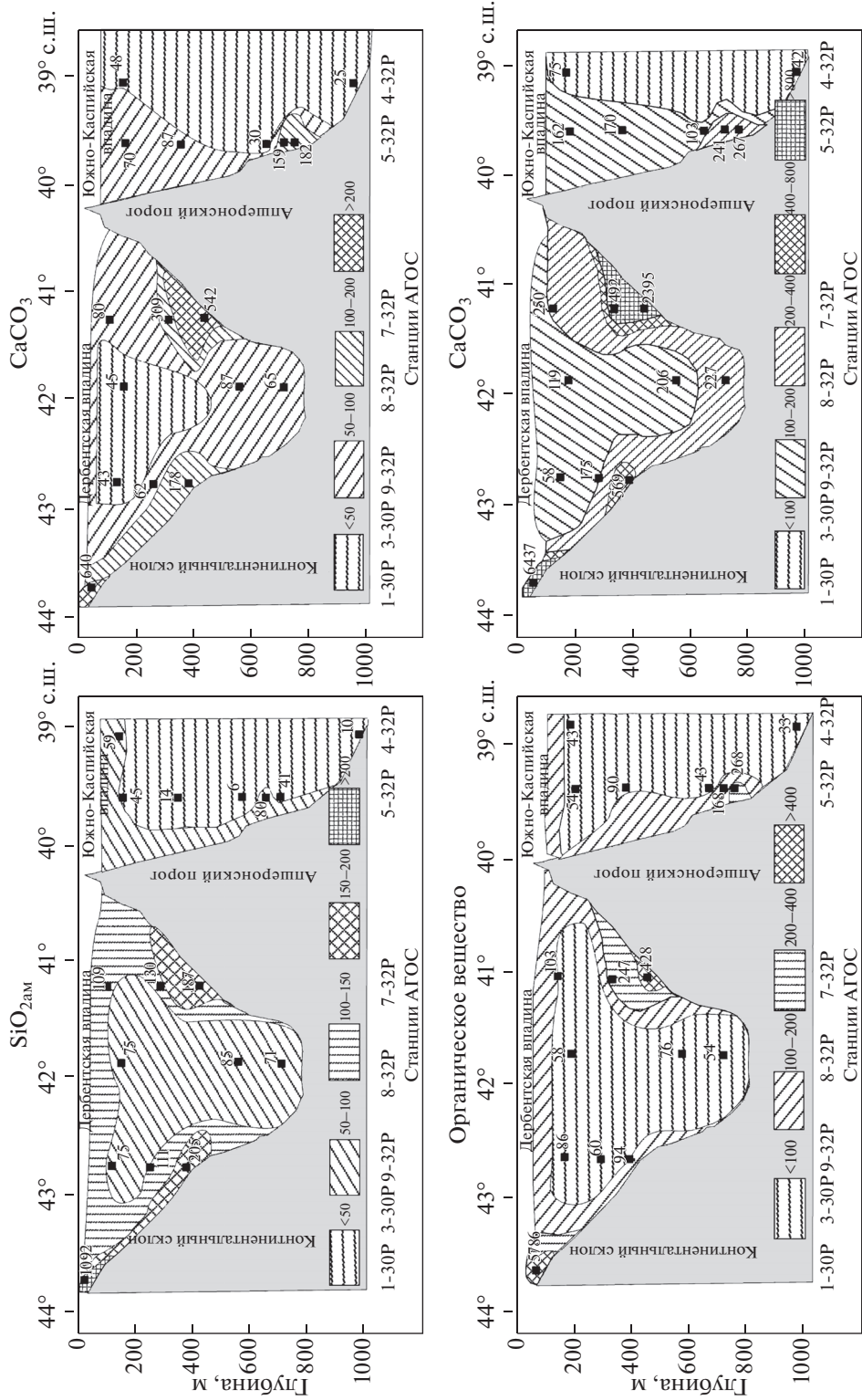


Рис. 2. Потoki взвешивающихся компонентов в водной толще на транскаспийском разрезе, г/м²/год.
 1 – SiO_{2am}, 2 – органическое вещество, 3 – CaCO₃, 4 – литогенное вещество.

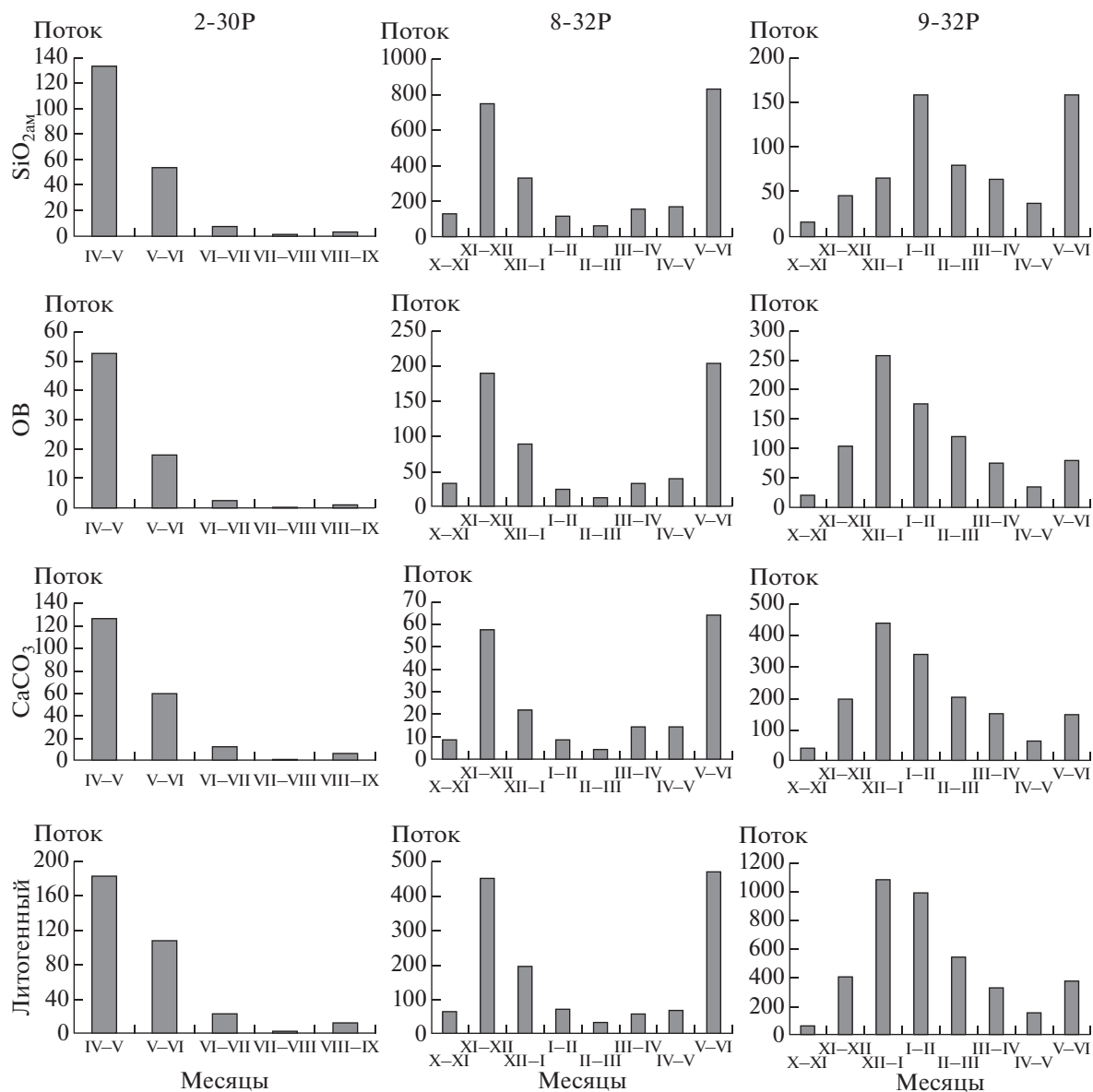


Рис. 3. Внутригодовая изменчивость потоков взвесеобразующих компонентов, мг/м²/сут.

ные значения приурочены только к склону Апшеронского порога, в пелагиали они минимальны.

Содержания **литогенного материала** во взвеси увеличиваются с глубиной на всех станциях (рис. 2а). Рост обусловлен уменьшением с глубиной содержания биогенных компонентов (растворение). Максимумы приурочены к склонам обеих впадин (дополнительный материал нефелоидного слоя). Над южным склоном Апшеронского порога на горизонте 696 м также отмечено повышенное содержание литогенного вещества, что обусловлено, по-видимому, склоновыми процессами.

Потоки литогенного вещества всюду уменьшаются от шельфа и склонов к центральным частям глубоководных впадин. Над склонами они

значительно увеличиваются из-за возникновения нефелоидного слоя. В центральных частях глубоководных впадин потоки литогенного вещества немного увеличиваются в глубоких слоях, что связано (как и для суммарных потоков) с поступлением осадочного вещества со склонов впадин.

Использование 12-стаканных седиментационных ловушек позволило исследовать внутригодовое распределение вертикальных потоков вещества во времени с шагом 30 суток (табл. 1). Выяснилось, что распределение потоков в Дербентской впадине сезонное — имеет весенний и осенний пики потоков, близкие по величине (рис. 3). Это обусловлено цветением фитопланктона, интенсивным его выеданием (фильтрацией) зоопланктоном и, соответственно, увеличением контей-

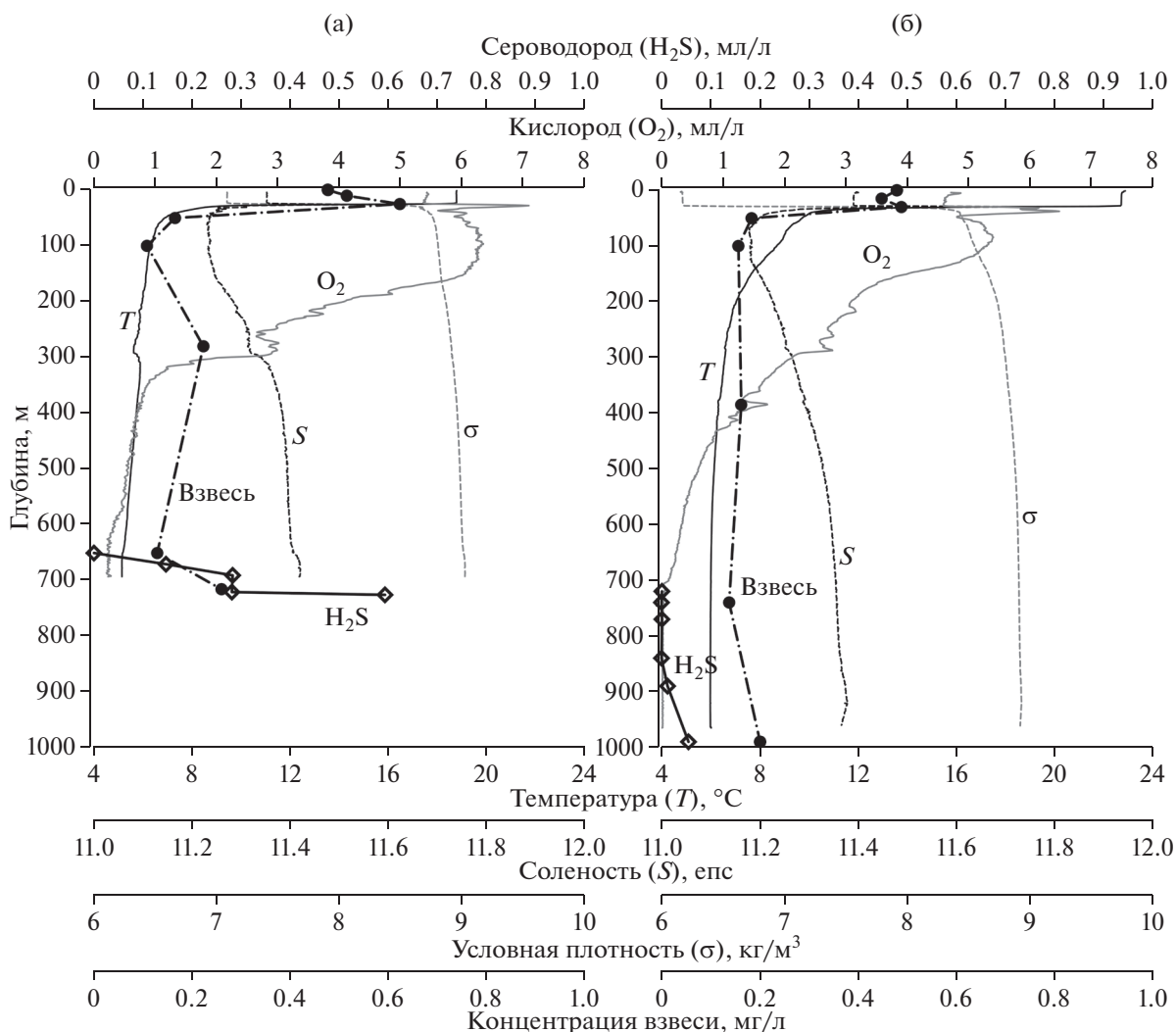


Рис. 4. Распределение гидрологических и гидрохимических характеристик в глубоководных котловинах Каспийского моря, по [1]: (а) – Дербентская впадина; (б) – Южно-Каспийская впадина.

нерного потока осаждающегося вещества. Летом и зимой потоки незначительны. Такая изменчивость связана с сезонностью биологических процессов в море и имеет глобальный характер [15]. Над северным склоном Дербентской впадины (АГОС 9-32Р) иное распределение вертикальных потоков. Здесь, кроме сезонных вариаций, обнаружен зимний максимум, обусловленный осаждением осадочного материала из нефелоидного слоя контурного течения, проходящего на глубинах 300–450 м. Это течение образуется зимой из-за стекания холодных вод с шельфа Северного Каспия (каскадинг) и отмечено над северным и южными склонами Дербентской впадины (скорости течения до 40 см/с в 10 м от дна, АГОС 9-32Р и 7-32Р) [18].

Железо и марганец. В настоящее время в Каспийском море постоянно наблюдается придонный слой с сероводородным заражением [1, 8, 24,

36]. Этот слой в Дербентской впадине имеет мощность около 100 м, в Южно-Каспийской – около 150 м (рис. 4) [1]. Верхняя часть толщи представлена окисленными водами, а с глубины приблизительно 500 м, где концентрации кислорода снижаются до менее 0.5 мл/л, распространяется слой кислородного минимума, который граничит с придонным слоем сероводородного заражения.

Железо и марганец, химические элементы с переменной валентностью, в различных физико-химических условиях водной среды могут вести себя по-разному. В осадочных породах железо находится в двух- и трехвалентном состоянии, причем преобладает последняя форма, а марганец в осадочных породах рассматривается как двухвалентный [22]. В процессе миграции они находятся преимущественно в растворенном состоянии. В окисленном слое морской воды гидрогенную часть Fe и Mn во взвеси представляют гидрокси-

ды и адсорбированные формы [5]. Попадая в восстановительную среду, обусловленную в морях обычно присутствием сероводорода, они переходят в состояние низших валентностей и, соответственно, в раствор.

Седиментационные ловушки стояли преимущественно в окислительных условиях, а нижние ловушки оказались в зоне кислородного минимума на склонах обеих впадин (АГОС 2–30Р, 9–32Р, 7–32Р, 5–32Р) и в слое с сероводородом у дна глубоководных впадин (АГОС 4–32Р, 8–32Р).

Концентрации Fe в осадочном веществе из седиментационных ловушек колеблются от 1.23 до 5.50%, причем экстремальные значения отмечены в материале из 12-стаканных ловушек. В толще воды невысокие концентрации отмечаются в материале из верхних седиментационных ловушек на глубинах 100–160 м (рис. 5а), они составляют 1.6–3.05%. Доля гидрогенной фракции, определенной методом терригенной матрицы, невелика. Максимальная концентрация Fe – над южным склоном Апшеронского порога – обусловлена, вероятно, привнесением Fe в море с гидротермальными водами Челекена [21] и распространением его циклоническим круговоротом, характерным для вод Южного Каспия и Каспийского моря в целом. Здесь же отмечено высокое содержание гидрогенной части Fe во взвеси, более 36%. Концентрации Fe увеличиваются с глубиной на всех станциях, что обусловлено растворением других компонентов взвеси (аморфного кремнезема диатомовых, органического вещества), увеличивается и доля гидрогенной части.

Распределение потоков Fe показывает (рис. 5б), что они уменьшаются от шельфа к центральным частям глубоководных впадин, максимальные значения 98 г/м²/год на северном шельфе Дербентской впадины, а минимальные – 2 г/м²/год в ее центре и 1.2 г/м²/год вблизи дна (955 м) в Южно-Каспийской впадине. В центре Дербентской впадины потоки Fe увеличиваются с глубиной (от 2 до 5 г/м²/год), а в Южном Каспии немного уменьшаются. Над склонами потоки Fe значительны и увеличиваются ко дну, над северным склоном Дербентской впадины они растут от 1.5 до 14 г/м²/год, а над склоном Апшеронского порога – от 5 до 51 г/м²/год. Рост потоков над склонами обусловлен, как и для взвесеобразующих компонентов, влиянием нефелоидного слоя контурного течения. В Южно-Каспийской впадине над склоном Апшеронского порога потоки Fe уменьшаются, по-видимому, в результате восстановления трехвалентного железа и перевода его в раствор, а ниже, в придонных горизонтах потоки значительно увеличиваются. Это может быть связано со склоновыми процессами, о чем свидетельствуют высокие валовые потоки вещества и потоки взвесеобразующих компонентов.

Концентрации марганца варьируют от 0.02 до 5.9%. Низкие значения (<0.05%) обнаружены в самых верхних ловушках, а также в придонной части водной толщи в Южно-Каспийской впадине, в слое с H₂S. С глубиной, по мере погружения осадочного вещества, концентрации Mn увеличиваются. Наиболее высокие значения (до 5.9%) – в осадочном материале из придонных ловушек (табл. 1, рис. 5в), стоявших над склонами в Дербентской котловине (АГОС 2-30Р, 9-32Р) и на склоне Апшеронского порога (АГОС 5-32Р). Эти ловушки стояли в слое воды с небольшими концентрациями кислорода – <0.5 мл/л. Следует отметить, что в нижних ловушках на станциях 2-30Р и 5-32Р в составе взвеси обнаружен карбонат Mn – родохрозит [17]. Высокие концентрации Mn во взвеси в слое кислородного минимума достаточно широко описаны в бассейнах с сероводородным заражением придонных вод [6, 7, 20, 22, 34, 36, 37 и др.]. Растворенный Mn²⁺ из восстановленного слоя диффундирует вверх и окисляется под воздействием микроорганизмов. В Каспийском море высокие концентрации Mn, связанные со слоем минимума кислорода, обнаружены впервые. В отличие от железа роль гидрогенной формы для Mn в окисленных водах определяющая, причем в материале из седиментационных ловушек над склонами она составляет более 90% от его валовых концентраций. Незначительна она только в материале из ловушки над шельфом (АГОС 1-30Р) и в восстановленных водах Южного Каспия.

Потоки Mn в верхних ловушках на разрезе уменьшаются от северного шельфа (АГОС 1-30Р, 48 м) Дербентской впадины – 0.97 г/м²/год, к ее центру – 0.03 г/м²/год. Над северным и южным склонами Апшеронского порога потоки выше – 0.1 и 0.95 г/м²/год соответственно, в центре Южно-Каспийской впадины (АГОС 4-32Р, 130 м) его потоки снижаются до 0.03 г/м²/год (рис. 5г). С глубиной потоки Mn увеличиваются, что обусловлено, прежде всего, значительным ростом его концентраций (табл. 1, рис. 5в). Максимальные потоки 40 г/м²/год отмечены в придонных горизонтах 685 и 696 м (АГОС 5-32Р, 716 м) над Южным склоном Апшеронского порога. Столь высокие потоки Mn могут быть обусловлены поступлением его с гидротермальными водами п-ова Челекен, разгружающимися непосредственно в море [21]. В придонных горизонтах над северным и южным склонами Дербентской впадины потоки Mn значительно ниже (0.6 и 7.3 г/м²/год соответственно), чем в Южно-Каспийской впадине.

Микроэлементы. Микроэлементы также были проанализированы атомно-абсорбционным методом и методом ICP MS (21 элемент). Прежде всего, были рассчитаны коэффициенты обогащения

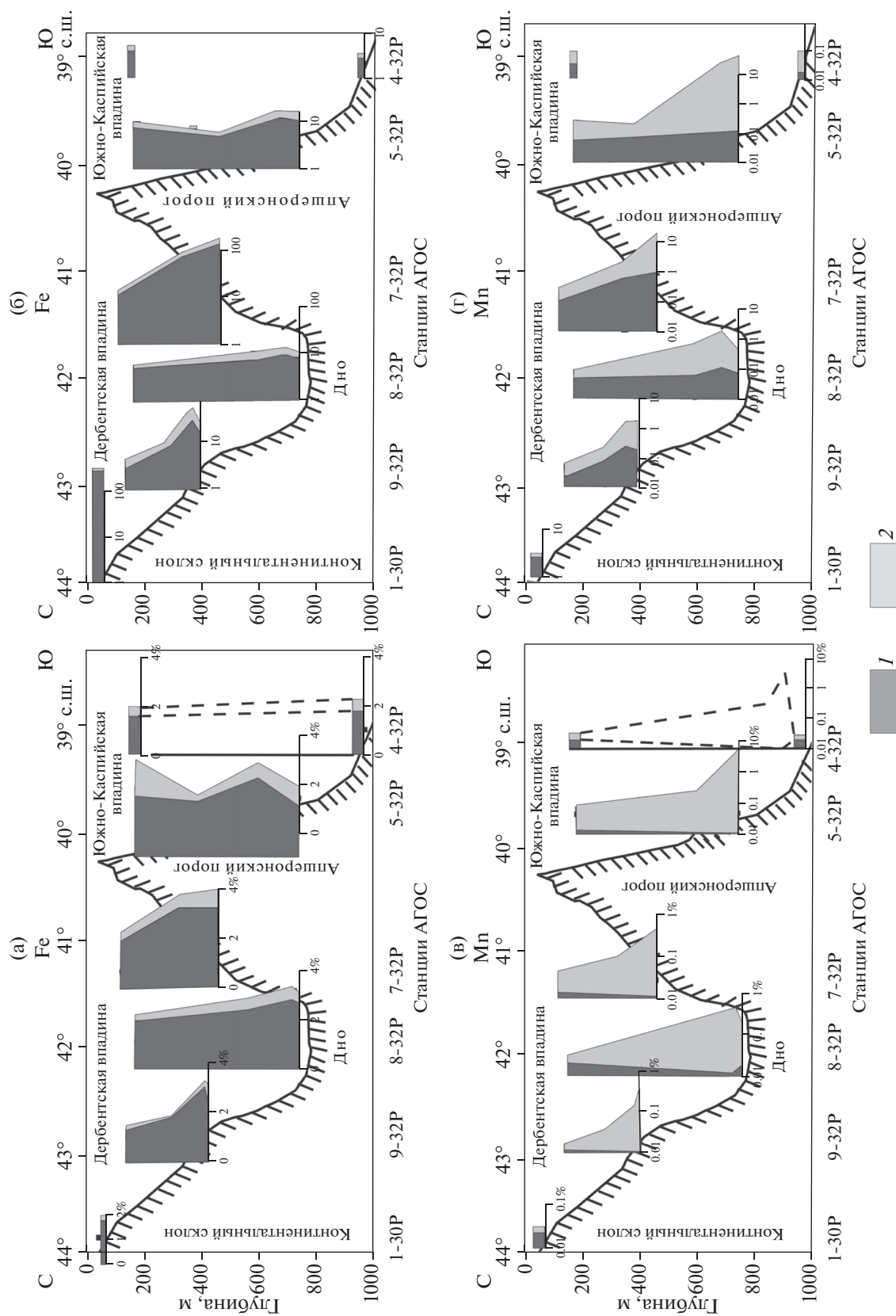


Рис. 5. Распределение концентраций и потоков Fe и Mn на транскаспийском разрезе и их терригенной и гидрогенной форм: (а) – концентрации и формы Fe; (б) – потоки терригенного и гидрогенного Fe; (в) – концентрации и формы Mn; (г) – потоки терригенного и гидрогенного Mn. 1 – терригенная форма, 2 – гидрогенная форма.

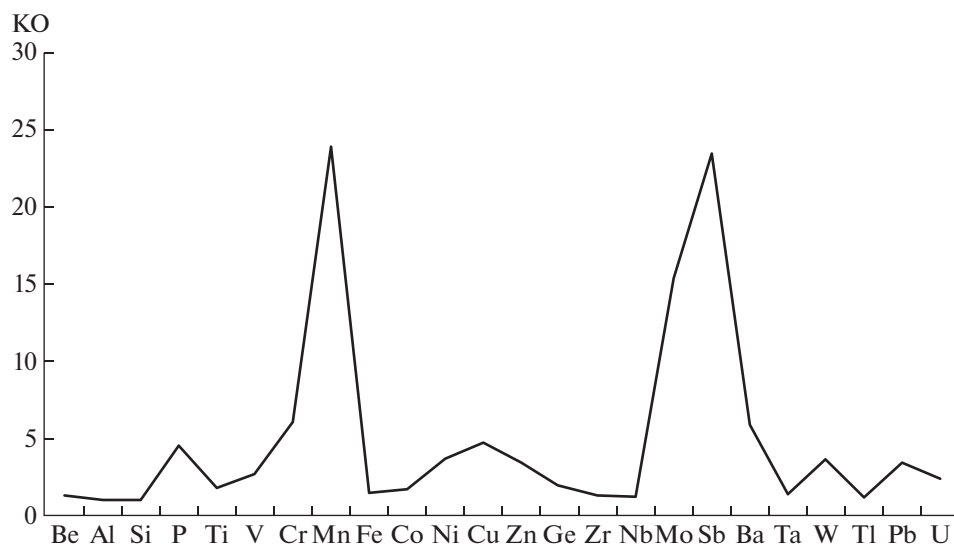


Рис. 6. Коэффициенты обогащения химических элементов в пробах взвеси из седиментационных ловушек.

ния (КО) взвеси относительно земной коры [35]. Они показали, что наиболее сильно обогащают взвесь марганец, сурьма и молибден – в 15–24 раза, обогащение взвеси Ba, Cr, P, Cu составляет более 4–6 раз. У остальных элементов КО меньше (рис. 6).

Была рассчитана корреляционная матрица для всех образцов (табл. 2), высокие коэффициенты корреляции выделены. Хорошо коррелируются с Al литофильные элементы, в том числе элементы-гидролизаты – Fe, Be, Ti, V, Ge, что свидетельствует о совместном нахождении этих элементов в составе породообразующих минералов.

С Fe коррелируют Be, Ti, V, Ge, Zr, Nb, Ta, что обусловлено, вероятно, совместным вхождением их в фемические минералы и продукты их экзогенной деградации (глинистые минералы).

| | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|-----|
| Al | Fe | Be | Ti | V | Ge | | |
| | 0.68 | 0.52 | 0.55 | 0.54 | 0.56 | | |
| Fe | Be | Ti | V | Ge | Zr | Nb | Ta |
| | 0.64 | 0.73 | 0.65 | 0.75 | 0.59 | 0.56 | 0.5 |
| Mn | Co | Mo | | | | | |
| | 0.77 | 0.72 | | | | | |
| Ti | V | Ge | Zr | Nb | Ta | | |
| | 0.76 | 0.79 | 0.75 | 0.91 | 0.7 | | |

С Mn коррелируют только Co и Mo. Исследуя связи микроэлементов в разных слоях водной толщи, мы обнаружили, что в слое кислородного минимума, где концентрации Mn превышают 1%, наблюдается хорошая корреляция Mn с Sb и Mo, что свидетельствует, по-видимому, об их накоплении во взвеси под влиянием микробиаль-

ных процессов. В этом слое корреляции марганца с другими микроэлементами не отмечено. В слое сероводородного заражения Mn коррелирует с литофильными элементами, а Sb и Mo коррелируются с Cu, типичным халькофильным элементом.

С Ti хорошо ($r > 0.7$) коррелируют элементы, вероятно, связанные с ним в аксессуарных минералах, не обнаруженных рентгендифрактометрическим анализом, по-видимому, из-за малых содержаний, но присутствующих в донных осадках (ильменит, циркон, сфен, рутил и др.) [10]. С другими породообразующими элементами микроэлементы не коррелируются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изменение химического состава вещества характеризуется закономерным уменьшением с глубиной содержаний биогенных компонентов ($\text{SiO}_{2\text{ам}}$ и ОВ), а содержание CaCO_3 практически не изменяется. Вклад литогенного вещества и Fe с глубиной повсеместно возрастает. Потоки взвесеобразующих компонентов уменьшаются с удалением от источников взвеси (суши, шельфа) и увеличиваются в глубоких слоях воды (более 500 м) в Дербентской котловине за счет поступления материала со склонов.

Над склонами Дербентской котловины (АГОС 9-32 и 7-32) отмечаются максимальные потоки вещества, а также близость его химического состава (табл. 1, рис. 1б). Сходен здесь и минеральный состав осадочного материала [16]. Это обусловлено воздействием контурного течения на тонкие (алевритово-пелитовые) донные осадки, происходит ресуспензия верхнего слоя и усреднение взвешенного вещества из-за постоянного

Таблица 2. Корреляционная матрица химических элементов для всех проб из седиментационных ловушек ($n = 51$)

| | Si | Al | P | C _{орг} | C _{карб} | Fe | Mn | Cu | Zn | Ni | Co | Cr | Be | Pb | Ti | V | Ge | Zr | Nb | Mo | Sb | Ba | Ta | W | Tl | U |
|-------------------|-------------|-------------|-------|------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|-------|-------|-------|------|---|
| Si | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al | 0.22 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P | 0.00 | 0.32 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C _{орг} | -0.35 | -0.10 | 0.17 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C _{карб} | -0.29 | -0.15 | -0.12 | 0.25 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe | 0.28 | 0.68 | 0.30 | -0.12 | -0.06 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mn | -0.07 | -0.02 | 0.01 | -0.24 | 0.28 | -0.11 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cu | -0.42 | -0.11 | 0.19 | 0.20 | -0.19 | 0.09 | -0.30 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zn | 0.21 | -0.19 | -0.18 | -0.31 | 0.03 | -0.16 | 0.18 | -0.27 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ni | -0.14 | 0.21 | -0.06 | -0.06 | 0.20 | 0.27 | 0.25 | 0.25 | -0.20 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Co | 0.05 | 0.23 | -0.01 | -0.40 | 0.27 | 0.23 | 0.77 | -0.34 | 0.13 | 0.30 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cr | 0.13 | 0.18 | -0.11 | -0.11 | 0.07 | 0.16 | -0.08 | -0.13 | 0.01 | 0.65 | -0.05 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| Be | 0.36 | 0.52 | 0.09 | -0.05 | -0.17 | 0.64 | -0.28 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | -0.10 | 0.15 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Pb | 0.11 | 0.18 | 0.15 | -0.09 | -0.09 | 0.18 | 0.24 | 0.17 | 0.39 | 0.36 | 0.09 | 0.16 | 0.35 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Ti | 0.16 | 0.55 | 0.08 | 0.02 | -0.09 | 0.73 | -0.40 | 0.14 | -0.19 | 0.12 | -0.18 | 0.09 | 0.79 | 0.09 | 1 | | | | | | | | | | | |
| V | 0.15 | 0.54 | 0.03 | -0.13 | 0.05 | 0.65 | 0.00 | 0.09 | -0.18 | 0.54 | 0.18 | 0.40 | 0.70 | 0.29 | 0.76 | 1 | | | | | | | | | | |
| Ge | 0.32 | 0.56 | 0.05 | -0.16 | -0.06 | 0.75 | -0.14 | -0.11 | -0.17 | 0.31 | 0.13 | 0.30 | 0.53 | -0.08 | 0.79 | 0.72 | 1 | | | | | | | | | |
| Zr | 0.11 | 0.38 | 0.00 | -0.05 | 0.03 | 0.59 | -0.19 | -0.17 | -0.23 | 0.00 | 0.07 | -0.04 | 0.41 | -0.29 | 0.75 | 0.53 | 0.80 | 1 | | | | | | | | |
| Nb | 0.11 | 0.36 | 0.05 | 0.06 | -0.05 | 0.56 | -0.35 | -0.04 | -0.06 | -0.04 | -0.22 | 0.03 | 0.78 | 0.12 | 0.91 | 0.67 | 0.66 | 0.73 | 1 | | | | | | | |
| Mo | -0.21 | -0.15 | 0.16 | 0.02 | 0.18 | -0.14 | 0.72 | -0.09 | 0.02 | 0.34 | 0.38 | 0.01 | -0.20 | 0.32 | -0.24 | 0.13 | -0.09 | -0.14 | -0.11 | 1 | | | | | | |
| Sb | -0.53 | -0.15 | 0.13 | 0.11 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.85 | -0.25 | 0.29 | -0.09 | -0.13 | -0.07 | 0.03 | 0.05 | 0.11 | -0.09 | -0.12 | -0.11 | 0.15 | 1 | | | | | |
| Ba | 0.34 | -0.26 | -0.20 | -0.32 | 0.03 | -0.08 | 0.07 | -0.42 | 0.32 | -0.21 | 0.30 | -0.10 | -0.15 | -0.21 | -0.20 | -0.12 | 0.02 | 0.11 | -0.11 | -0.04 | -0.32 | 1 | | | | |
| Ta | -0.02 | 0.33 | 0.00 | -0.05 | 0.13 | 0.50 | -0.16 | 0.12 | -0.29 | 0.03 | -0.03 | -0.14 | 0.47 | -0.06 | 0.70 | 0.49 | 0.47 | 0.63 | 0.64 | -0.13 | 0.09 | -0.16 | 1 | | | |
| W | 0.03 | 0.25 | 0.18 | -0.23 | 0.21 | 0.25 | 0.49 | -0.13 | -0.02 | 0.64 | 0.42 | 0.62 | 0.07 | 0.34 | 0.02 | 0.43 | 0.27 | -0.03 | -0.04 | 0.42 | 0.06 | -0.18 | -0.06 | 1 | | |
| Tl | -0.21 | 0.10 | 0.13 | -0.01 | -0.23 | 0.23 | -0.36 | 0.90 | -0.29 | 0.33 | -0.30 | 0.03 | 0.26 | 0.12 | 0.37 | 0.34 | 0.13 | 0.00 | 0.14 | -0.17 | 0.80 | -0.32 | 0.27 | -0.05 | 1 | |
| U | 0.57 | 0.28 | 0.02 | -0.08 | -0.17 | 0.36 | -0.21 | -0.07 | 0.20 | 0.31 | -0.16 | 0.56 | 0.40 | 0.39 | 0.20 | 0.30 | 0.28 | -0.04 | 0.14 | -0.20 | -0.34 | -0.05 | -0.09 | 0.26 | 0.00 | 1 |

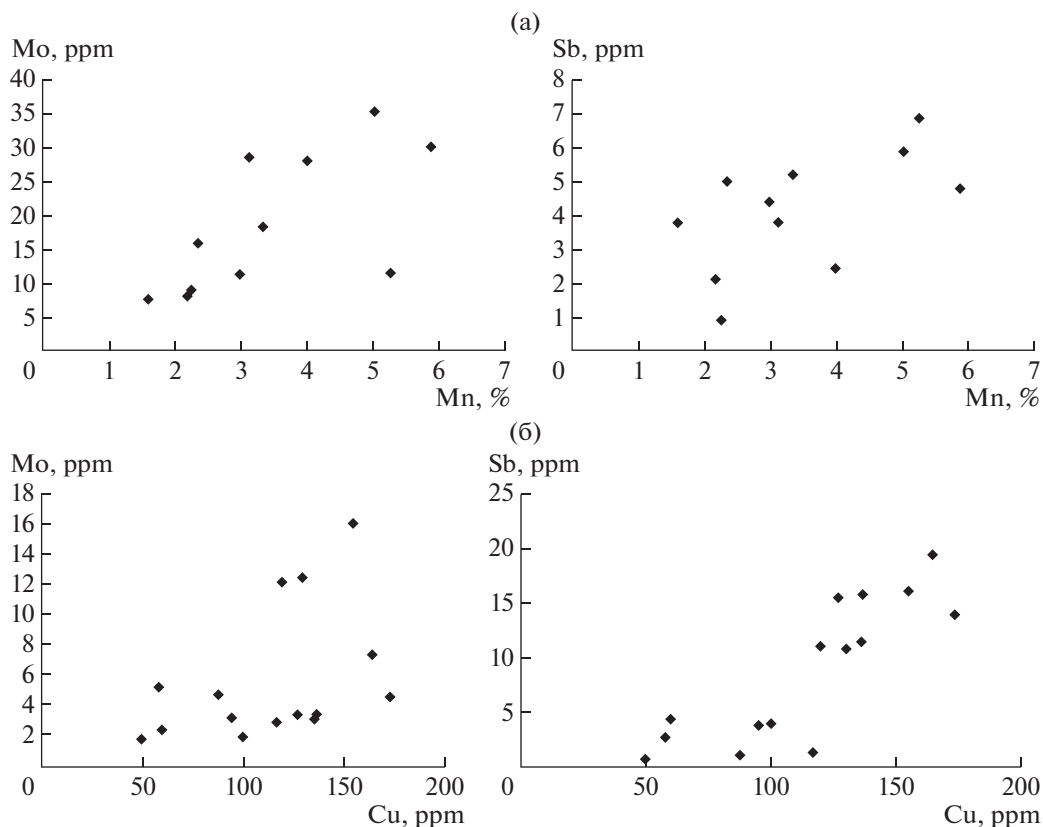


Рис. 7. Корреляционные соотношения Mo и Sb с Mn в слое кислородного минимума (а) и с Cu в придонном слое с H_2S (б).

взмучивания, переноса и переотложения его по всей траектории течения.

Впервые изучено сезонное изменение потоков четырех главных компонентов осадочного вещества – биогенной триады (OB , $SiO_{2ам}$, $CaCO_3$) и литогенного вещества.

Характер распределения концентраций и потоков Fe во многом совпадает с распределением содержаний и потоков литогенным веществом. Концентрации и потоки марганца увеличиваются по мере осаждения, достигают высоких значений в слое кислородного минимума вблизи границы с придонным слоем с H_2S заражением, а в этом слое резко уменьшаются (Mn переходит в раствор). Исследование микроэлементов показало, что в основном они связаны с терригенным веществом.

Авторы благодарят А.Н. Новигатского за помощь в сборе материала, Л.А. Гайворонскую за проведение первичной обработки полученных проб, Е.О. Золотых и Л.В. Демину за качественное выполнение химических анализов, А.С. Филиппова за помощь в подготовке статьи.

Обработка материала, полученного ранее, выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-27-00114).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбросимов А.К., Кловиткин А.А., Артамонова К.В. и др. Комплексные исследования системы Каспийского моря в 41-м рейсе научно-исследовательского судна “Рифт” // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 5. С. 715–720.
2. Бруевич С.В. *Гидрохимия Среднего и Южного Каспия*. М.: Изд-во АН СССР, 1937. 352 с.
3. Бруевич С.В. *Гидрохимические черты Каспийского моря* // *Природа*. 1938. № 4. С. 16–27.
4. Дара О.М., Козина Н.В., Гордеев В.В. Новые данные о карбонатакопчении в Каспийском море. Находка кутнагорита в Южной котловине // *Материалы VII Всероссийского Литологического совещания* (Новосибирск, 28–31 октября 2013 г.). Новосибирск: ИНГГ СО РАН. 2013. Т. 1. С. 261–263.
5. Демина Л.Л. *Формы миграции тяжелых металлов в океане*. М.: Наука, 1982. 120 с.
6. Емельянов Е.М. *Поливалентные металлы в водах и взвеси бассейна Атлантического океана // Взаимодействие между водой и живым веществом*. М.: Наука, 1979. Т. 1. С. 59–65.

7. Емельянов Е.М., Стрюк В.Л. Водная взвесь // Осадкообразование в Балтийском море / Под ред. Лисицына А.П., Емельянова Е.М. М.: Наука, 1981. С. 79–106.
8. Иванов М.В., Саввичев А.С., Кловиткин А.А. и др. Возобновление сероводородного заражения водной толщи глубоководных впадин Каспийского моря // Докл. РАН. 2013. Т. 453. № 1. С. 76–81.
9. Каспийское море. Проблемы седиментогенеза / Под ред. Холодова В.Н. и др. М.: Наука, 1989. 182 с.
10. Козина Н.В., Новигатский А.Н. Состав обломочных минералов поверхностного слоя донных осадков Каспийского моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 378–395.
11. Косарев А.Н. Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во МГУ, 1975. 272 с.
12. Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Политова Н.В. и др. Исследование биогенной и абиогенной частей взвеси дельты реки Волги в период весеннего половодья (май 2008 г.) // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 2. С. 151–164.
13. Лисицын А.П. Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли // Глобальные изменения природной среды-2001 / Ред. Добрецов Н.Л., Коваленко В.И. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2001. С. 163–248.
14. Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадкообразовании в морях и океанах. М.: Наука, 1988. 309 с.
15. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.
16. Лисицын А.П., Лукашин В.Н., Дара О.М. Минеральный состав и потоки минералов во взвеси из толщи вод Каспийского моря // Докл. РАН. 2015. Т. 463. № 2. С. 221–225.
17. Лисицын А.П., Лукашин В.Н., Новигатский А.Н. и др. Глубоководные обсерватории на транскаспийском разрезе – непрерывные исследования потоков рассеянного осадочного вещества // Докл. РАН. 2014. Т. 456. № 4. С. 485–489.
18. Лукашин В.Н., Лисицын А.П., Новигатский А.Н. и др. О вертикальных потоках вещества в Каспийском море // Океанология. 2014. Т. 54. № 2. С. 216–225.
19. Лукашин В.Н., Новигатский А.Н., Кловиткин А.А. и др. Аэрозоли в приводном слое Каспийского моря // Материалы VII Всероссийского Литологического совещания. (Новосибирск, 28–31 октября 2013 г.). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. Т. II. С. 193–197.
20. Пахомова С.В., Розанов А.Г., Якушев Е.В. Растворенные и взвешенные формы железа и марганца в редокс-зоне Черного моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 6. С. 835–850.
21. Печенкин И.Г., Печенкин В.Г. Рудогенез в нефтегазоносных бассейнах с эксфильтрационным гидродинамическим режимом // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2009. Т. 4. № 3. С. 1–17.
22. Розанов А.Г. Окислительно-восстановительная стратификация воды Черного моря // Океанология. 1995. Т. 35. № 4. С. 544–549.
23. Ронов А.Б., Ярошевский А.А. Химическое строение земной коры // Геохимия. 1967. № 11. С. 1285–1309.
24. Сапожников В.В., Азаренко А.В., Гращенкова О.К., Кивва К.К. Гидролого-гидрохимические исследования Среднего и Южного Каспия на научно-исследовательском судне “Исследователь Каспия” (2–17 сентября 2006 г.) // Океанология. 2007. Т. 47. № 2. С. 212–215.
25. Тужилкин В.С., Гончаров А.В. О вентиляции глубинных вод Каспийского моря // Тр. ГОИН. 2008. Вып. 211. С. 43–64.
26. Хрусталева Ю.П. Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. Ленинград: Наука, 1989. 261 с.
27. Юдович Я.Э., Кемпис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (Литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 740 с.
28. Alldredge A.L., Silver M.W. Characteristics, dynamics and significance of marine snow // Progress in Oceanography. 1988. V. 20. P. 41–82.
29. Dellwig O., Leipe T., Glockzin M. et al. A new particulate MN-FE-P-shuttle at the redoxcline of anoxic basins // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2010. V. 74. № 24. С. 7100–7115.
30. Kepkay, P.E. Particle aggregation and the biological activity of colloids // Marine Ecology Project Series. 1994. V. 109. P. 293–304.
31. Komar P.D., Morse A.P., Small L.F., Fowler S.W. An analysis of sinking rates of natural copepod and euphausiid fecal pellets // Limnol. Oceanogr. 1981. V. 26. P. 172–180.
32. Lisitzin A.P. Sediment fluxes, natural filtration and sedimentary systems of a “Living Ocean” // Russian Geology and geophysics. Special Issue. Novosibirsk: SB RAS, 2004. V. 45. P. 12–43.
33. Mortlock R.A., Froelich P.N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments // Deep-Sea Res. 1989. V. 36. No. 9. P. 1415–1426.
34. Pohl C., Löffler A., Hennings U. A sediment trap flux study for trace metals under season aspects in the stratified Baltic Sea (Gotland Basin; 57°19.20' N; 20°03.00' E) // Marine Chemistry. 2004. V. 84. P. 143–160.
35. Rudnic R.L., Gao S. Composition of continental crust // Treatise on Geochemistry / Eds. Holland H.D., Turekian K.K. V. 3. The Crust. Amsterdam, Boston et oth.: Elsevier Pergamon, 2004. P. 1–64.
36. Serebrennikova E., Dukhova L., Sapozhnikov V.V. Modern state of the Caspian oxygen minimum zone // http://modb.oce.ulg.ac.be/colloquium/2014/#col_abstracts.
37. Yemenicioglu S., Erdogan S., Turgul S. Distribution of dissolved forms of iron and manganese in the Black Sea // Deep-Sea Res. II. 2006. V. 53. P. 1842–1855.

Geochemistry of the Dispersed Sedimentary Matter and Its Fluxes in Water Column of the Caspian Sea

V. N. Lukashin, A. P. Lisitzin

The first data on the chemical composition of the dispersed matter from the sediment traps are presented. Suspended matter forming components of the sedimentary material – amorphous silica, organic matter and carbonates, lithogenic matter, and Fe, Mn, and trace elements are considered. As a result, it found that intra-annual variability of the vertical fluxes of the sedimentary material shows a seasonal increase in spring and autumn. High fluxes of components of sedimentary material on the northern and southern slopes of the Derbent basin caused by winter sedimentation of material from nepheloid layer formed over the contour current.